

超音波通信を用いたフェーズドアレイ測位システムの開発(第2報)

田畑 克彦 久富 茂樹 遠藤 善道

A Phased-Array Positioning System using Ultrasonic Communication (2nd Report)

Katsuhiko TABATA Shigeki KUDOMI Yoshimichi ENDO

あらまし 無人搬送車または移動ロボットなどの自律移動装置を誘導するための超音波測位システムを開発している。本測位システムは、自律移動装置上の測位モジュールが、経路上にあるランドマーカの役割をするトランスポンダーと超音波通信を行うことで、相対位置を計測することができる。これまでは走行時に問題となっていた床や天井反射による性能劣化の抑制について検討してきたが、本年度は廊下などの比較的狭い空間を走行することを想定し、壁による反射の影響とその抑制方法について走行経路に注目して検討した。この結果、ランドマーカのある壁とは反対側の壁に沿って走行することにより、壁反射の影響を抑制できることを確認した。

キーワード 測位システム, 超音波センサー, フェーズドアレイ, 移動ロボット

1. はじめに

無人搬送車や移動ロボットの経路誘導を行うことを目的として、経路変更の自由度が高く、低コストな超音波フェーズドアレイ測位システム(以降“フェーズドアレイ”を“PA”と記す)を開発している^[1~3]。

超音波PA測位システムは、ルート設定用のランドマーカ(以降“マーカ”と記す)として、磁気テープなどの代わりに超音波センサーを使用する。誘導方法としては、無人搬送車に搭載する超音波PA測位システム(以降“ソナーシステム”と記す)が、特定のマーカと超音波によるID通信を行って順次マーカを識別し、マーカとの相対位置(距離と方位角)を計測しながら走行することを想定している。位置が不明なマーカも確実に応答させることができるように、ソナーシステムにはSN比の高い先鋭化した超音波ビームを走査できるPA技術を採用している^[1~3]。

昨年度は信号利得を制御する機能を付加することにより、測位距離を10mまで拡張した。さらに床や天井などの反射による性能低下を防ぐためのスポンジガードをランドマーカに実装し、性能低下を低減した。

本年度は屋内環境に存在する廊下に代表される比較的狭い空間で走行実験を行った。この結果、IDが判別できないため、測位できない領域があることが判明した。そこで、廊下モデルを作成し、シミュレーションにより反射波の強度が比較的強いと予想される1回反射波の時間遅れからIDが判別できない領域を予測し、走行実験により確認したので報告する。

2. 超音波PAシステムと課題

本章では本測位システムの概略について説明する。また、移動台車に測位システムを搭載して、廊下の中央を走行した場合の実験結果を示し、廊下走行における測位の課題を明らかにする。

2. 1 超音波PA測位システム

図1は移動台車に取り付けたソナーシステムである。ソナーシステムによるマーカ測位のための信号処理および信号制御用のハードウェアとしてマイコン(STM32F103ZE)及びFPGA(XC3S1200E)を用いている。ソナーシステムとマーカのIDによる相互通信は、2値ASK(Amplitude Shift Keying)を用いてID信号長を7bit、通信速度を625bpsとしている。測位計算は、マイコンの処理負荷を軽減し、高速なハードウェア処理が可能なFPGAで処理させるため、比較的単純な送受信パルスの到来タイミングから計測する方法を用いた^[1]。

図2は開発したマーカである。マーカは経路上に多数設置することが想定されるので、コストを意識し、マイコンのみの単純な構成としている。同図右にマーカの上下方向の超音波ビーム指向性を示す。スポンジガードによって上下方向の超音波の伝搬を制限するよう改良している^[3]。この改良は、マーカとソナーシステムの相対位置によっては、直接入射するID信号と床または天井から反射されたID信号の合成によりIDの情報が変化し、IDが認識できない問題を解決するために施している。

表1は使用した超音波センサー素子の主な仕様である。

2. 2 廊下走行測位実験と問題点

図3に示すように、壁際にマーカを設置し、そこから10m離れた地点から、ソナーシステムを搭載した移動台車を廊下の中央を速度約10mm/sで走行させてマーカを測位した。この時のソナーシステムの超音波センサー部の実装高さは50mmとした(図1)。実装高さを低くすると、床

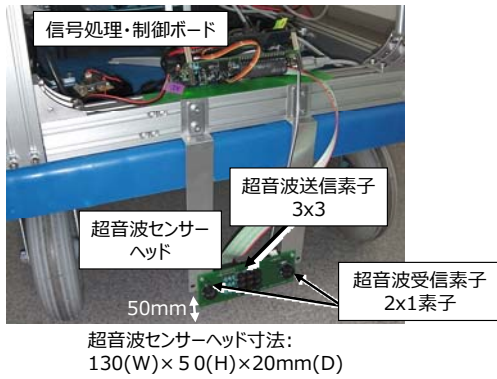
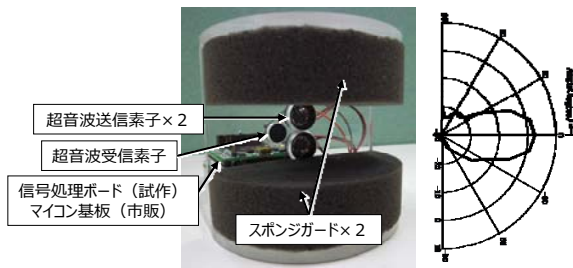


図1 移動台車に実装したソナーシステム



寸法: 100(W) x 90(H) x 150mm(D)

図2 ランドマーカー (左: 外観, 右: 上下方向の指向性)

表1 超音波センサー素子の仕様

| | ソナーシステム | | ランドマーカー | |
|---------------|-------------|---------|---------|---------|
| | 送信素子 | 受信素子 | 送信素子 | 受信素子 |
| 製造者 | 日本セラミック株式会社 | | | |
| 型番 | T4010A1 | R3216A1 | T3216A1 | R4010A1 |
| 中心周波数 | 40kHz | 32.7kHz | 32.7kHz | 40kHz |
| 送信音圧レベル | 117 dB* | - | 113 dB* | - |
| 受信感度 | - | -69 dB* | - | -67 dB* |
| 指向性 (-6dB 全角) | ±50° | ±35° | ±35° | ±50° |

*0dB = 10V/Pa

反射信号による前述のIDを認識できない問題をさらに抑制できる。

図4は廊下を2回走行させて、ソナーシステム(移動台車)の位置を2次元平面上にプロットした結果である。図中の原点をマーカーの設置位置とし、四角で囲った領域が廊下範囲である。本図によれば実際の走行経路より若干右にプロットされていることがわかる。この原因として、温度センサーを基板上に取り付けたため、基板上的ICなどの熱により実際の気温よりも高く計測されて、距離計算に用いるための音速が大きくなっていることが考えられる。また、6000mm以上ではx座標方向に広がりが発生している。これについては、SN比の低下による限界であるため、マーカーを6000mm以内の設置間隔とするか、2マーカー測位による精度向上^[2]が対策として考えられる。

この結果で重要な課題は、測位分布にバラツキがあることである。特に、y値が2000mm超～6000mm超では1000mm～2000mmと比較してプロット数が少なく、デー

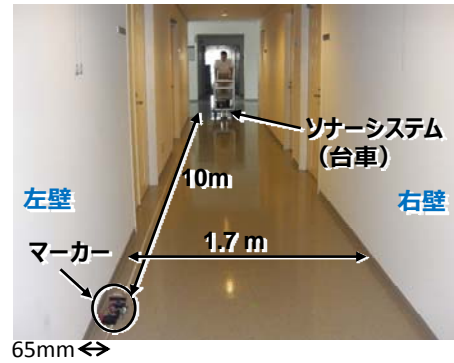


図3 廊下走行測位実験のようす

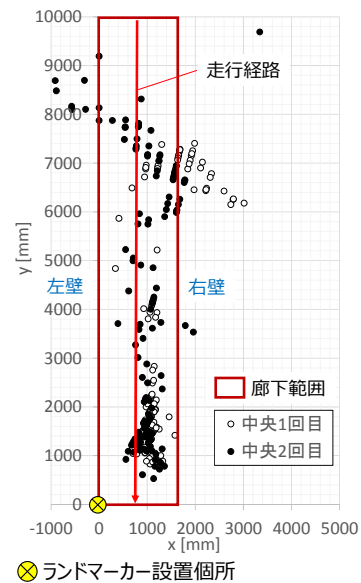


図4 測位結果

タ取得が困難になっていることが確認できる。これは、位置によってソナーシステムかマーカーのいずれかがIDを認識できず、測位が困難であることを示している。実際の運用を想定した場合、このように測位できない位置があると、無人搬送車が自己位置を見失うことになり、経路の逸脱などの重大な問題が発生するので、対策が必要である。

3. 廊下走行シミュレーション

超音波測位時にIDが認識できない現象の要因としては、前述したように直接信号波と床または天井からの反射信号波の合成によりIDが変化し、IDが認識できないという問題がある。今回の原因も、床や天井と同様、壁からの反射信号との合成によってIDが変化し、認識できなかったと予想される。したがって同様の対策が有効と考えられるが、スポンジガードにより左右方向に制限を加える方法は、検出すべき直接信号の範囲も制限してしまうため、有効な対策ではない。そこで、設置高さを低くすることに類似したアプローチを行う。本報では、正常にID信号を認識できる領域を推定するため、廊下モデル

を構築し、数値計算により有効な経路を推定した。

3. 1 シミュレーションモデル

通常、マーカーは通行の障害とならないように、廊下の端に設置する。図3の走行実験では左壁際に設置した。今回は、最も単純なケースを想定し、1回反射がゴーストを生成すると想定する。この場合、図5に示すように直接信号と右壁からの反射信号がランドマーカーに到達する。左壁で反射した信号は2回以上反射しないと到達できないため、今回は考慮していない。

具体的に図5の廊下モデルを構築し、数値計算を行った。数値計算にあたっての前提条件は以下のとおりである。

- 両側に垂直な壁がある幅W[mm]の廊下とし、マーカーは壁際の座標原点Oに設置する
- 移動装置は座標A(x_a, y_a)に存在し、常にy軸（壁）に平行で原点方向の向きで移動する
- 超音波通信が可能な指向性は±45[deg]以内とし、通信可能距離は10000mmとする
- IDが変化して検出できなくなる直接信号と反射信号の時間差dtは1.2msから11.2msである

IDが変化する時間差dtは図6の超音波IDの通信仕様において、第2bit以降に反射パルスが到来する時間差としている。

図5における主な数値計算式は以下のとおりである。直接信号の行路長ℓ_{dir}:

$$\ell_{dir} = \sqrt{x_a^2 + y_a^2} \tag{1}$$

右壁のy軸反射点y_R:

$$y_R = \frac{W \cdot y_a}{2W - x_a} \tag{2}$$

反射信号の行路長ℓ_{ref}:

$$\ell_{ref} = \overline{RM} + \overline{AR} = \sqrt{W^2 + y_R^2} + \sqrt{(W - x_a)^2 + (y_R - y_a)^2} \tag{3}$$

時間差dt:

$$dt = \frac{\ell_{ref} - \ell_{dir}}{c} \tag{4}$$

反射信号の伝搬方位角θ_M:

$$\theta_M = \theta_A = \sin^{-1} \left(\frac{W}{\sqrt{W^2 + y_R^2}} \right) \tag{5}$$

直接信号の伝搬方位角θ_d:

$$\theta_d = \sin^{-1} \left(\frac{x_a}{\sqrt{x_a^2 + y_a^2}} \right) \tag{6}$$

ここで、(4)式のcは音速[m/s]を表す。

3. 2 シミュレーション結果と考察

図7は前節の前提条件をもとに、数値計算した結果である。図において、黒色の領域は測位が困難な領域であり、領域AはゴーストによりIDが変化する領域、領域Bは指向性が±45deg以上となる領域、領域Cは伝搬距離(行路長)が10000mm以上となる領域である。逆に白色の領域は正常に通信できると予測される領域である。同図において第2章の実験のように中央を走行した場合は、2000mmを超えたあたりから、7000mmまでが黒色の領域にかかっている。これは廊下中央を走行した図4の実験結果とおおむね一致している。

この結果から、マーカーに対して反対側の壁沿い、つまり図の右側の経路を走行すると、白色の領域を走行す

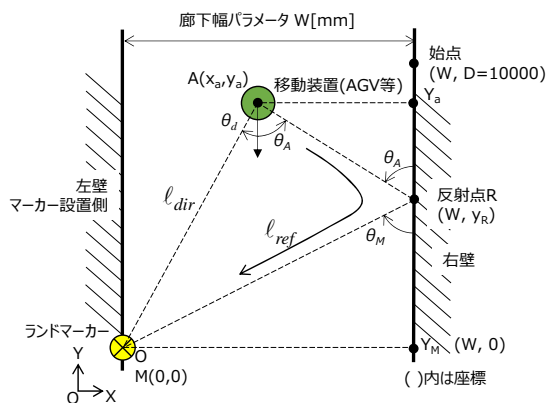


図5 廊下走行の計算モデル

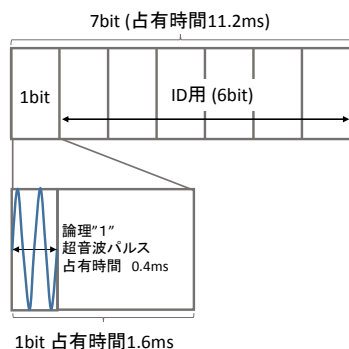


図6 超音波ID通信パッケージ

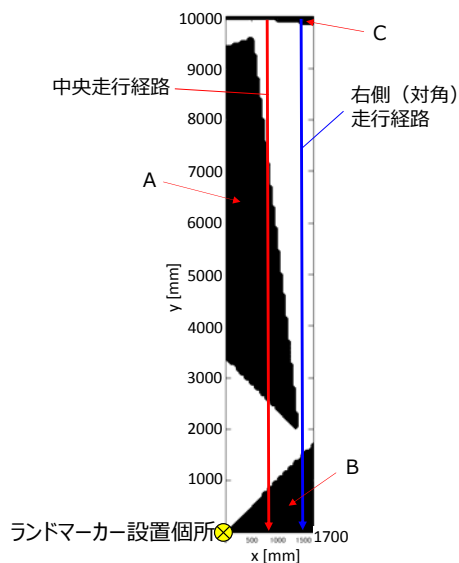


図7 廊下走行のシミュレーション結果

るため、安定した測位が維持できると予想される。

4. 検証実験

前章のシミュレーションによる予測が妥当であることを確認するための検証実験を行った。実験方法は2.2節と同様であるが、図8に示すように、ソナーシステムの実装位置を可能な限り壁際とするため、移動台車の左側に取付けた。壁とソナーシステムの測位基準位置（センサーヘッド中央）との距離は115mmである。

図9が測位結果である。2.2節と同様、右側に測位値が若干シフトしている。また、6000mmを超えるとSN比の低下によりx座標値のバラツキが大きくなる。

ソナーシステムの位置分布を比較すると、y座標値が



図8 廊下走行検証実験の様子

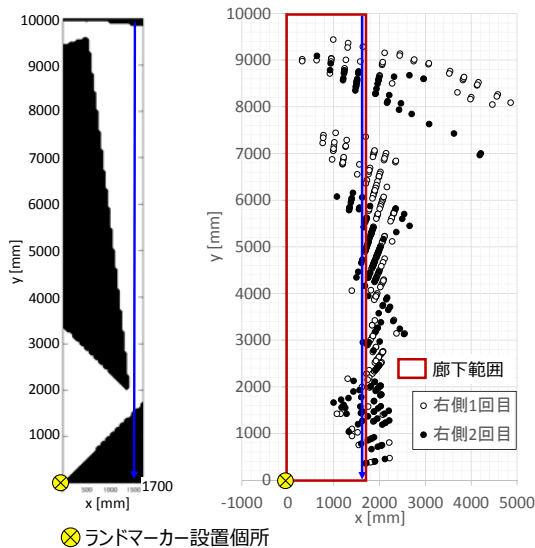


図9 右側(対角)走行時の測位結果

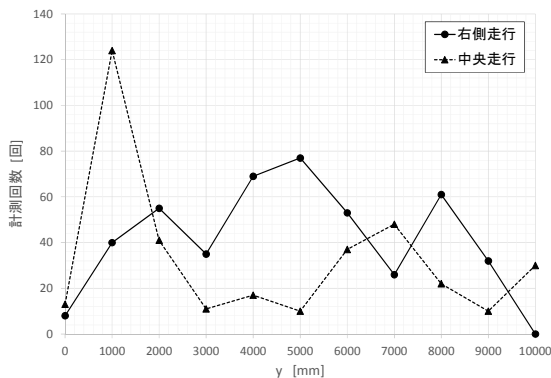


図10 y座標値と計測回数(頻度)の関係

8000mm手前を除けば、どの位置においても安定して測位できていることが確認できる。より結果を分かり易くするため、図10に両者のy座標値と計測回数(2回走行の総和)の関係を示した。横軸のプロットは1000mm間隔であるが、例えば3000mmの場合、移動台車のy座標値が3000mm以上4000mm未満にある場合の計測回数を示している。移動台車はほぼ定速で移動しているため、計測回数が多いほど測定が安定していることを示している。本図より、中央走行時は3000mmを超えると低下するが、右側走行時は2000mm以上では変動は見られるものの中央走行時より安定して計測できていることがわかる。逆に中央走行時は1000~2000mmの計測回数が非常に高い。これは、マーカーが計測視野内に収まっていることと、計測距離が2500mm以内では計測時間が短縮される機能³⁾によるものである。

5. まとめ

超音波通信を用いた超音波PA測位システムを用いて、両側に壁のある廊下において走行実験を行った。この結果、測位が困難な領域が存在することを示した。この原因として、これまでの床および天井反射による影響と同様に、壁反射によりIDが変化し、認識できなくなることを推測した。

そこで、廊下環境をモデル化し、1回反射信号がID認識に影響するとして数値シミュレーションを行った結果、マーカーと反対側の壁沿いルートが反射信号の影響を受けづらい領域であることを予測した。また検証実験の結果、シミュレーションと一致していることを確認できた。よって、両側が壁となる廊下においては、本シミュレーションの方法を用いるなどして走行経路を検討する必要がある。今後は企業への技術移転を進めながら、技術的課題については逐次対応する予定である。

文献

- [1] 田畑克彦, 西田佳史, 飯田佳弘, 岩井俊昭, “超音波センサアレイを用いた新しいナビゲーションシステム”, 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.1, pp.11-19, 2012.
- [2] 田畑克彦, 久富茂樹, 岩井俊昭, 遠藤善道, 西田佳史, 組込技術を用いた高性能ワイヤレスセンサシステムの研究開発(第3報)ー超音波フェーズドアレイ測位システムー, 岐阜県情報技術研究所研究報告書, No.15, pp.15-20, 2014.
- [3] 田畑克彦, 久富茂樹, 遠藤善道, 超音波通信を用いたフェーズドアレイ測位システムの開発(第1報), 岐阜県情報技術研究所研究報告書, No.16, pp.44-48, 2015.